# 高密度天体内部における原子核の形状に対する再考

Supernova

Gyroid


中里 健一郎（京大理）

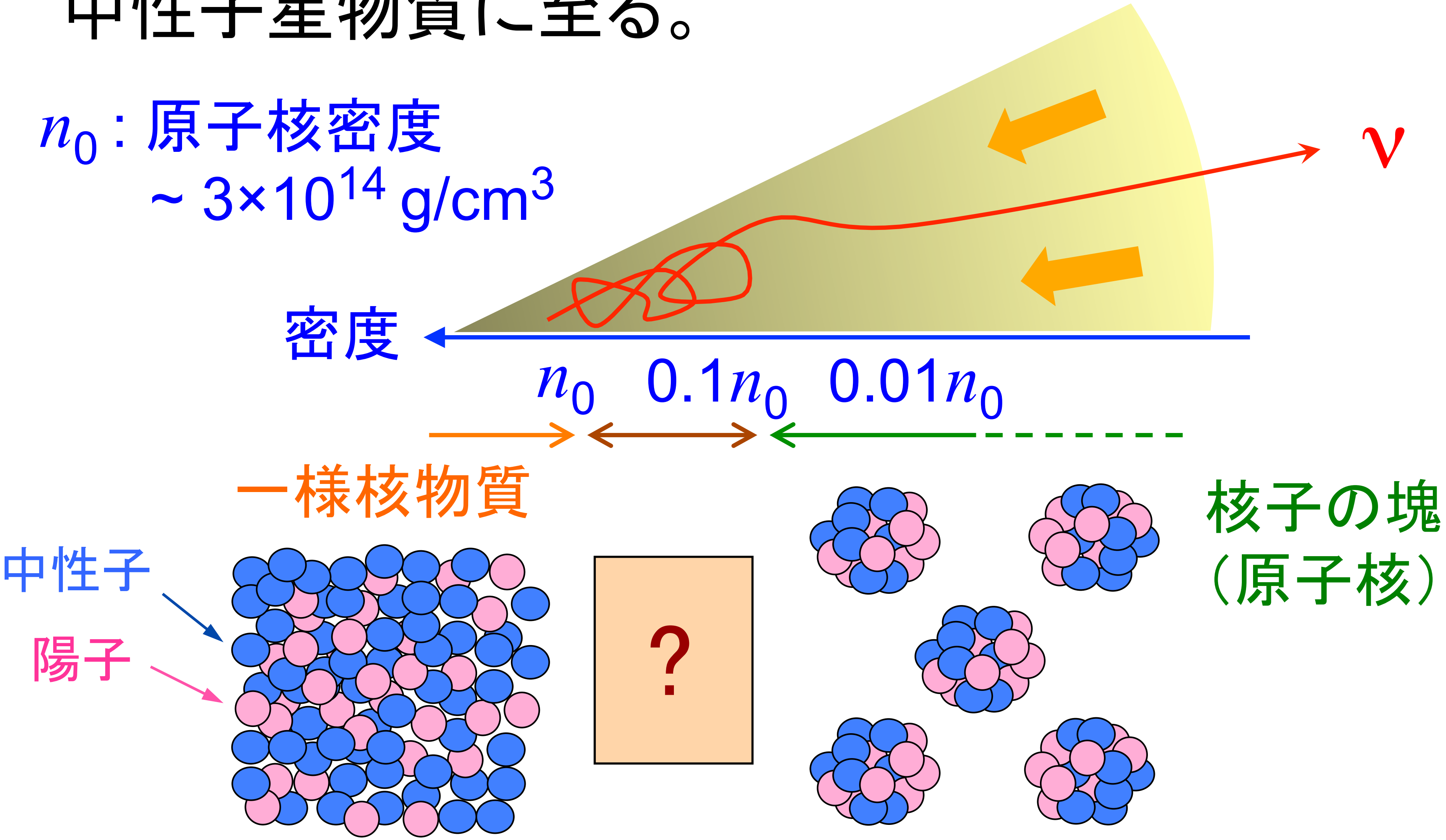


Ref: Nakazato et al., *Physical Review Letters* **103** (2009), 132501
Nakazato et al., arXiv:1011.3866 [nucl-th]


2010, 12, 22, 第23回理論懇シンポジウム＠京都大学

# 高密度下における原子核の溶解

- 重力崩壊型超新星では、鉄の原子核から高密度中性子星物質に至る。



# 原子核パスタ

• 核密度以下で「原子核」が変形する。

Figure by K. Oyamatsu (1993)

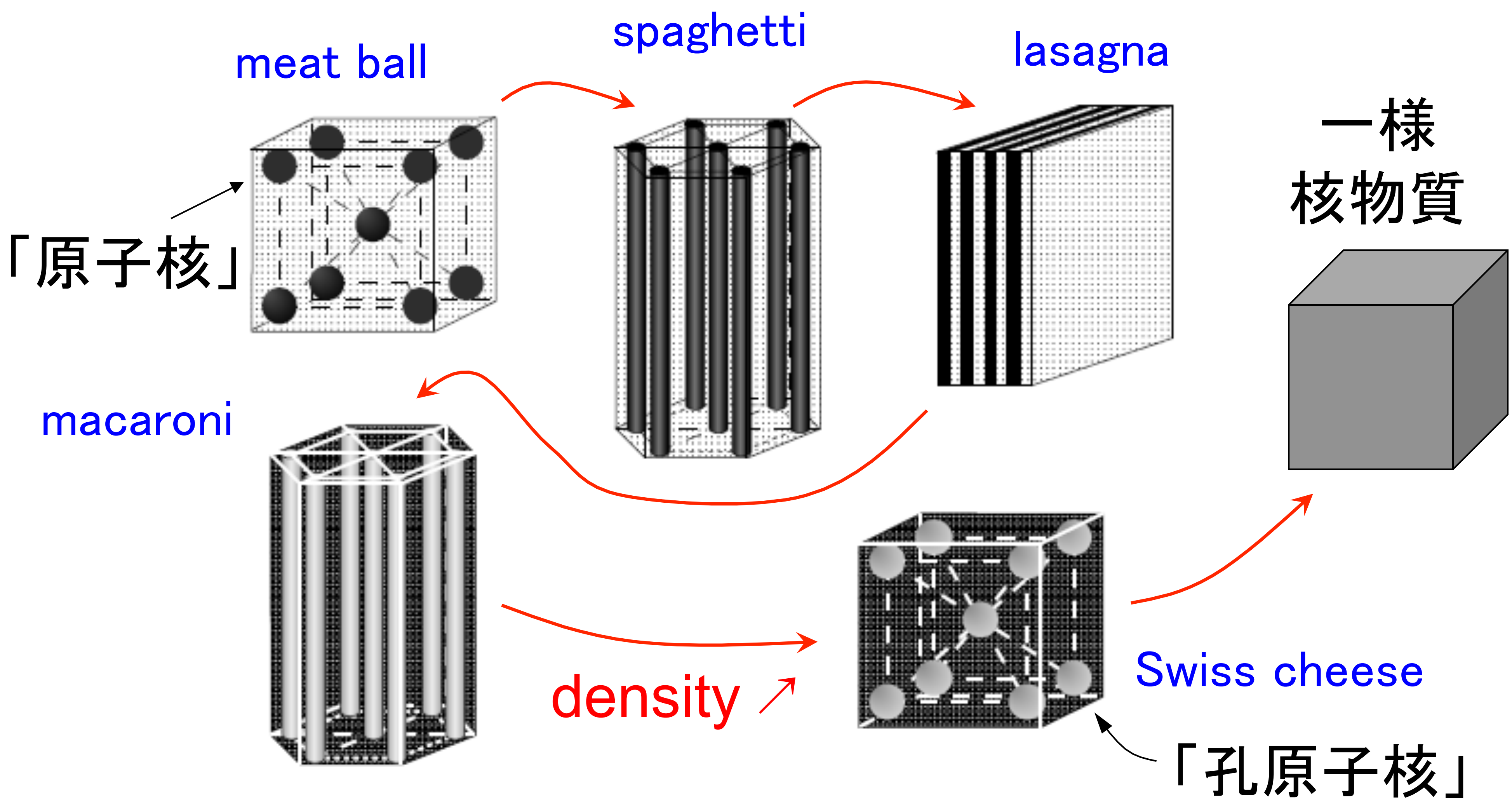



Fig. 1

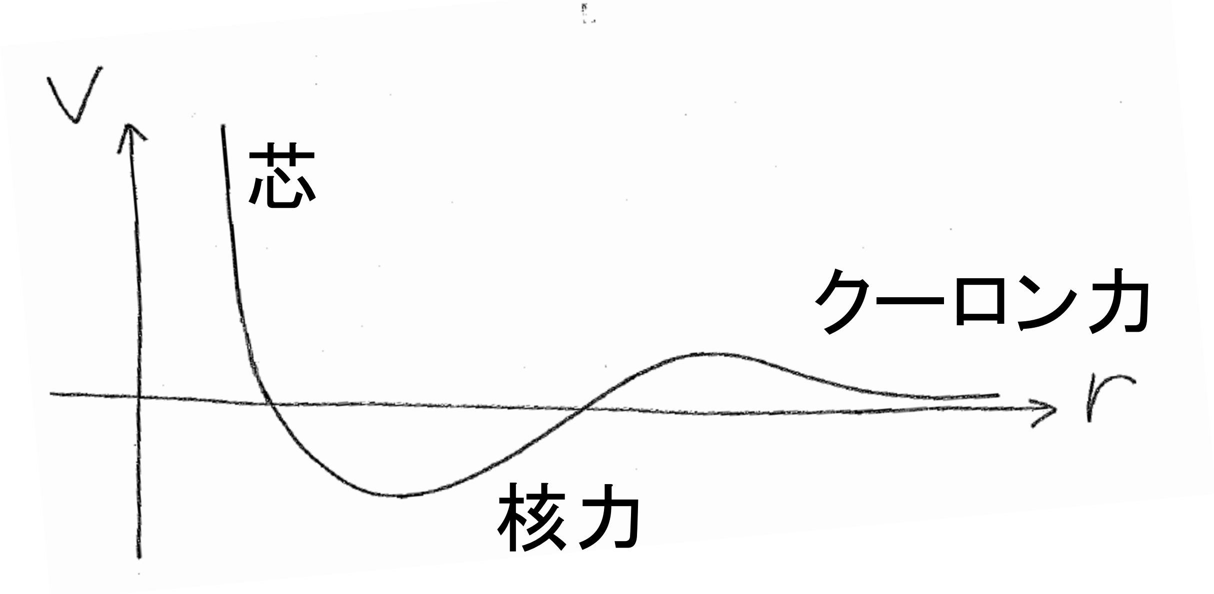
# なぜパスタ構造ができるのか？

- 短距離の斥力（核力の芯）
- 中距離の引力（核力）

→　これがないと、一様分布になるだけ。

- 長距離の斥力（クーロン力）

→　これがないと、大きな１つの塊になるだけ。

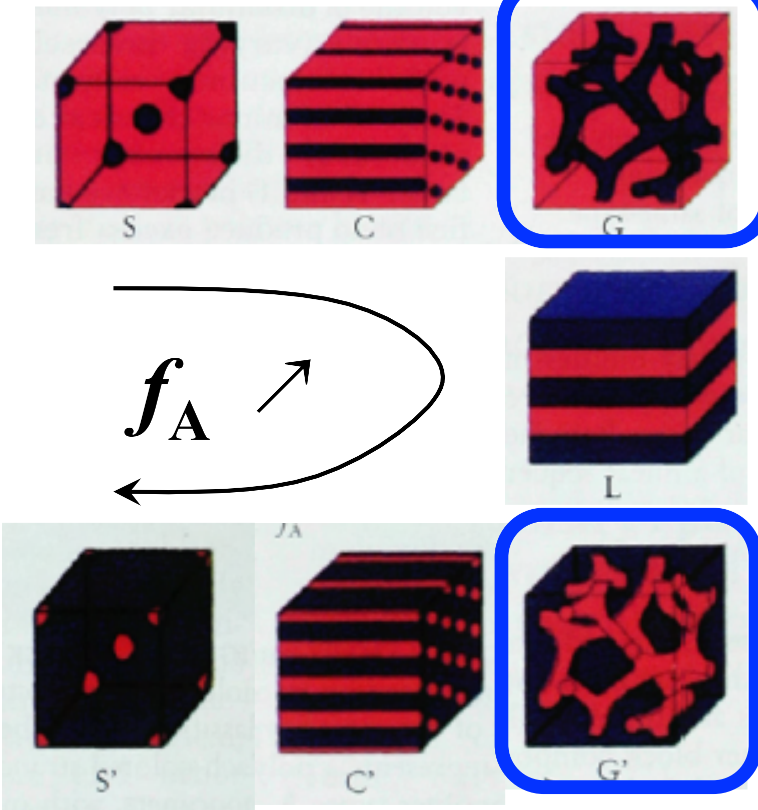


# 高分子における「パスタ」構造

- 2種の高分子の混合物(ブロック共重合体)の相分離

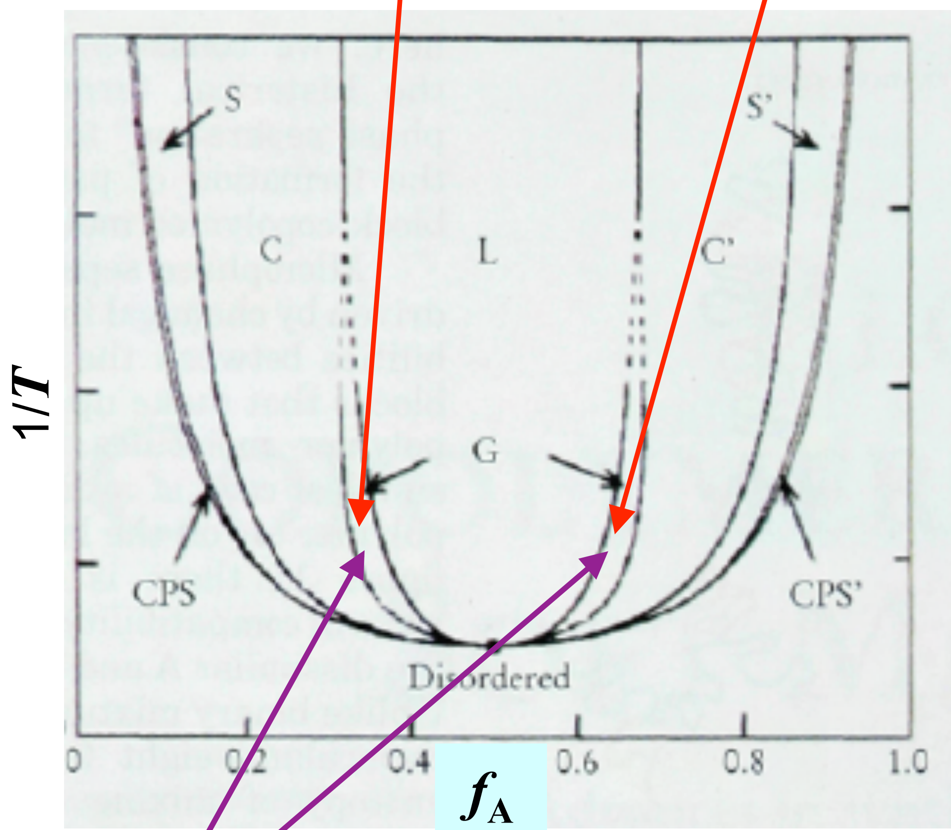
$f_A$: 高分子A(黒)の混合比

原子核パスタでは考慮されていない




Gyroid 構造

$f_A \sim 0.35$ $f_A \sim 0.65$

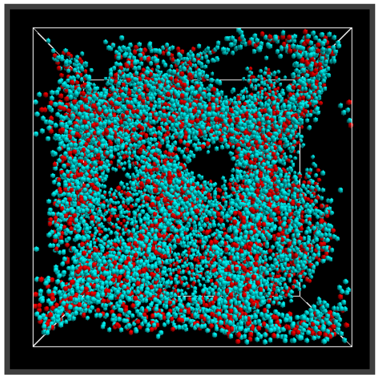



Phys. Today **52**, No.2, 32 (1999)

# これまでの原子核パスタの研究

- 液滴模型
  - 先に形状を仮定する。
  - 原子核内の核子の密度分布は一様
  - 扱いが簡便なため、様々な物理を調べたり、系統的に解析する際に有利。

- Thomas-Fermi 計算、Hartree-Fock 計算
  - エネルギー最小な核子の密度分布を計算する。
- Quantum Molecular Dynamics
  - 核子のダイナミクスを追う。
  - 新たな「中間相」の発見



Sonoda et al., Phys. Rev. C **77**, 035806 (2008)

# 今回の研究

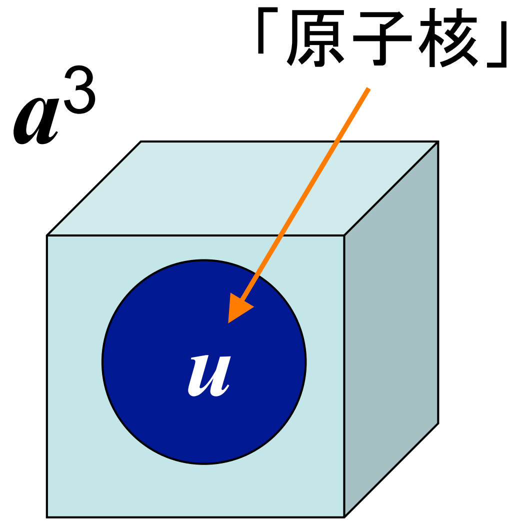
- 高分子物理学から、新候補として類推される Gyroid 構造を近似式により扱い、そのエネルギーを液滴模型を用いて計算する。

$$f(x,y,z) = \sin\frac{2\pi x}{a}\cos\frac{2\pi y}{a} + \sin\frac{2\pi y}{a}\cos\frac{2\pi z}{a} + \sin\frac{2\pi z}{a}\cos\frac{2\pi x}{a} = \pm k,$$

- これまでの液滴模型では、ほとんど扱われてこなかった曲率効果を摂動的に取り入れる。

# 今回のモデル

- 液滴模型
  - 体積 $a^3$ のセルを考える。
  - 「原子核」の体積比を $u$ とする。
  - 中性子と陽子は「原子核」の中に存在。(proton fraction: $x_p$ = 0.3)
  - 電子はセル内に一様に分布

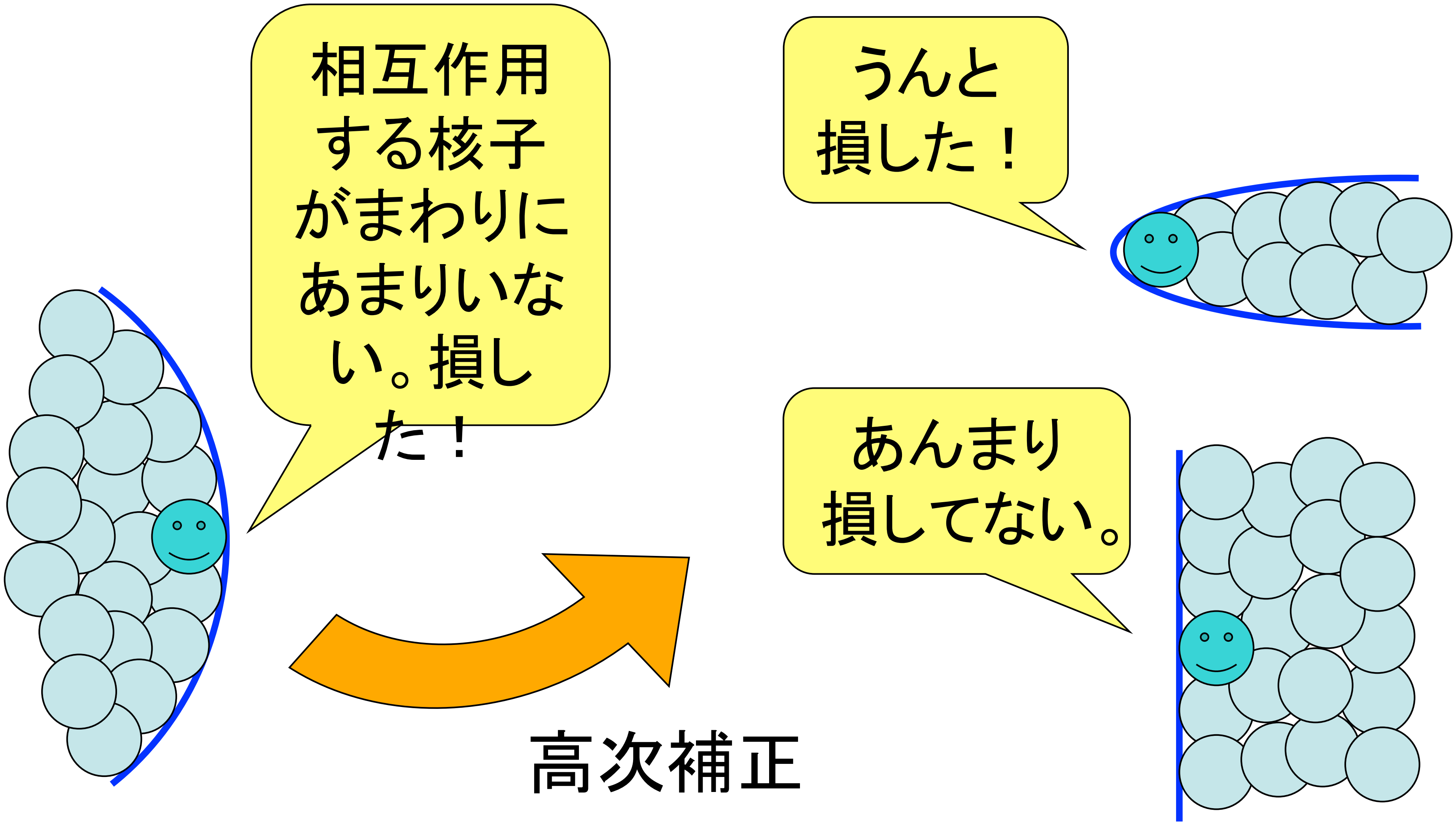



- セル内の全エネルギーを次のように与える。

$$W = \underbrace{W_b}_{\substack{\text{体積項} \\ \propto a^3}} + \underbrace{W_s}_{\substack{\text{表面項} \\ \propto a^2}} + \underbrace{W_c}_{\substack{\text{曲率項} \\ \propto a}} + \underbrace{W_{\mathrm{Coul}}}_{\substack{\text{クーロン項} \\ \propto a^5}}$$

# 曲率効果とは？

- 表面項
- 曲率項



# エネルギー表式

- 表面項: $W_\mathrm{s} = \boldsymbol{\sigma}\ \underline{\boldsymbol{g}(\boldsymbol{u}, \mathrm{shape})}\ \boldsymbol{a}^2$

表面張力　　規格化表面積

- 曲率項: $W_\mathrm{c} = \boldsymbol{\omega}\ \underline{\boldsymbol{h}(\boldsymbol{u}, \mathrm{shape})}\ \boldsymbol{a}$

曲率の大きさの係数

$$\underline{h(u, \mathrm{shape})} = \frac{1}{a}\int_{S(u,\mathrm{shape})} \underline{H(x,y,z)}\mathrm{d}S$$

平均曲率

- クーロン項:

規格化クーロンエネルギー

$$W_\mathrm{Coul.} = (\boldsymbol{e}\boldsymbol{x}_\mathrm{p}\boldsymbol{n}_0)^2 \boxed{\boldsymbol{w}_\mathrm{Coul}(\boldsymbol{u}, \mathrm{shape})}\ \boldsymbol{a}^5$$

# サイズ平衡

曲率項が小さいとき、 $\dfrac{\partial}{\partial a}\left(\dfrac{W}{a^3}\right) = 0 \quad \Rightarrow$

規格化表面＋クーロンエネルギー

$$\left(\frac{W}{a^3}\right) = w_b + \frac{3}{\sqrt[3]{4}}\left(e x_{\mathrm{p}}\, n_0\, \sigma\right)^{2/3} \boxed{g^{2/3} w_{\mathrm{Coul}}^{1/3}}$$

$$\underbrace{+ \sqrt[3]{4}\left[\frac{\left(e x_{\mathrm{p}}\, n_0\right)^4 \omega^3}{\sigma^2}\right]^{1/3} \boxed{\frac{w_{\mathrm{Coul}}^{2/3} h}{g^{2/3}}}}_{\text{曲率効果}}$$

規格化曲率エネルギー

$\boxed{\phantom{xx}}$ : geometry のみで決まる部分

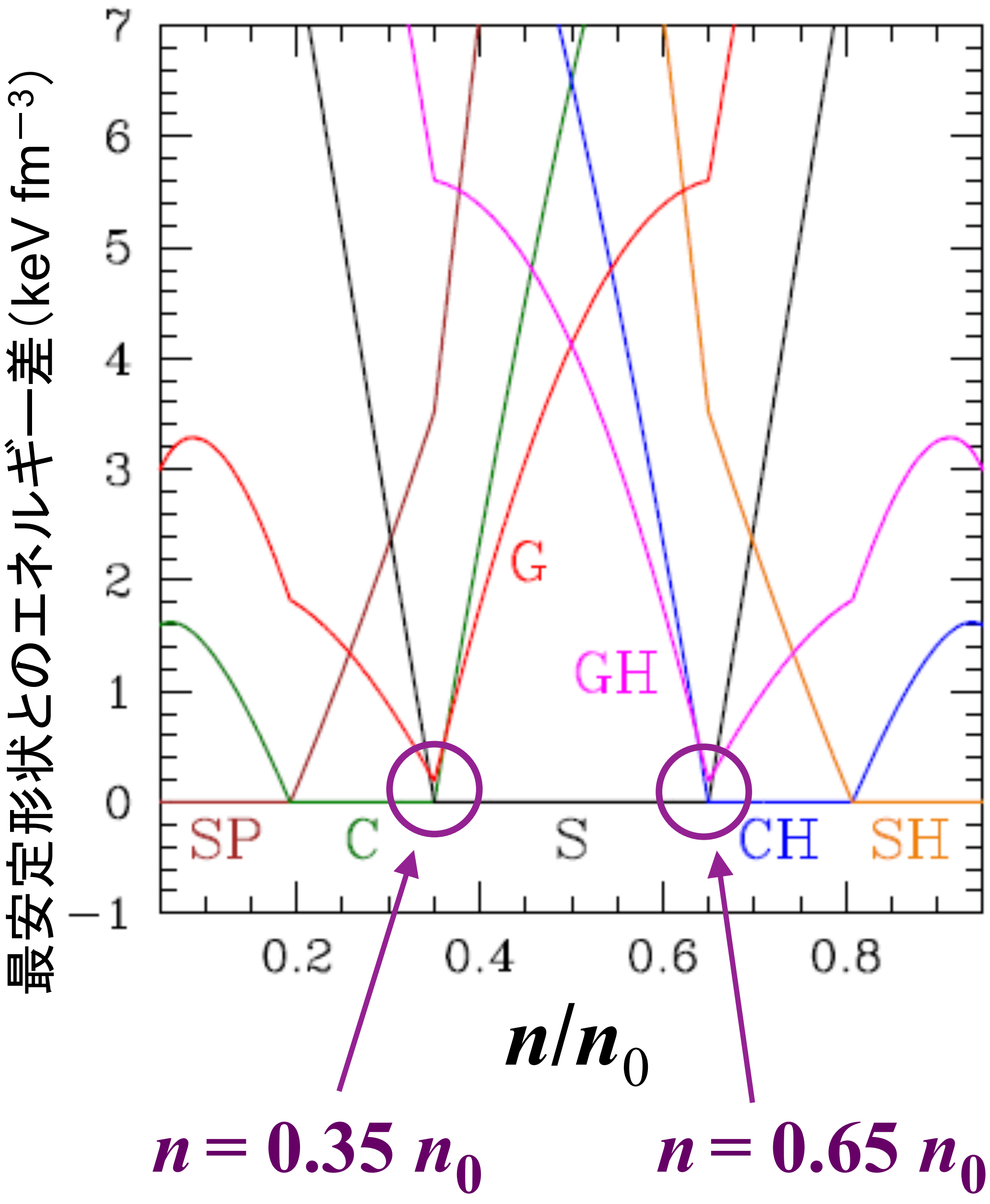
# 最安定形状(曲率なしの場合)

- 表面張力は
  $\sigma$ = 0.73 MeV/fm$^2$
  を仮定。
- 球(SP) → 円柱(C) → 板(S) → 円柱孔(CH) → 球孔(SH) と推移。
- Gyroid はエネルギー最小ではないが、通常のパスタ相との差はわずか:

  ~ 3 keV per nucleon << $T$

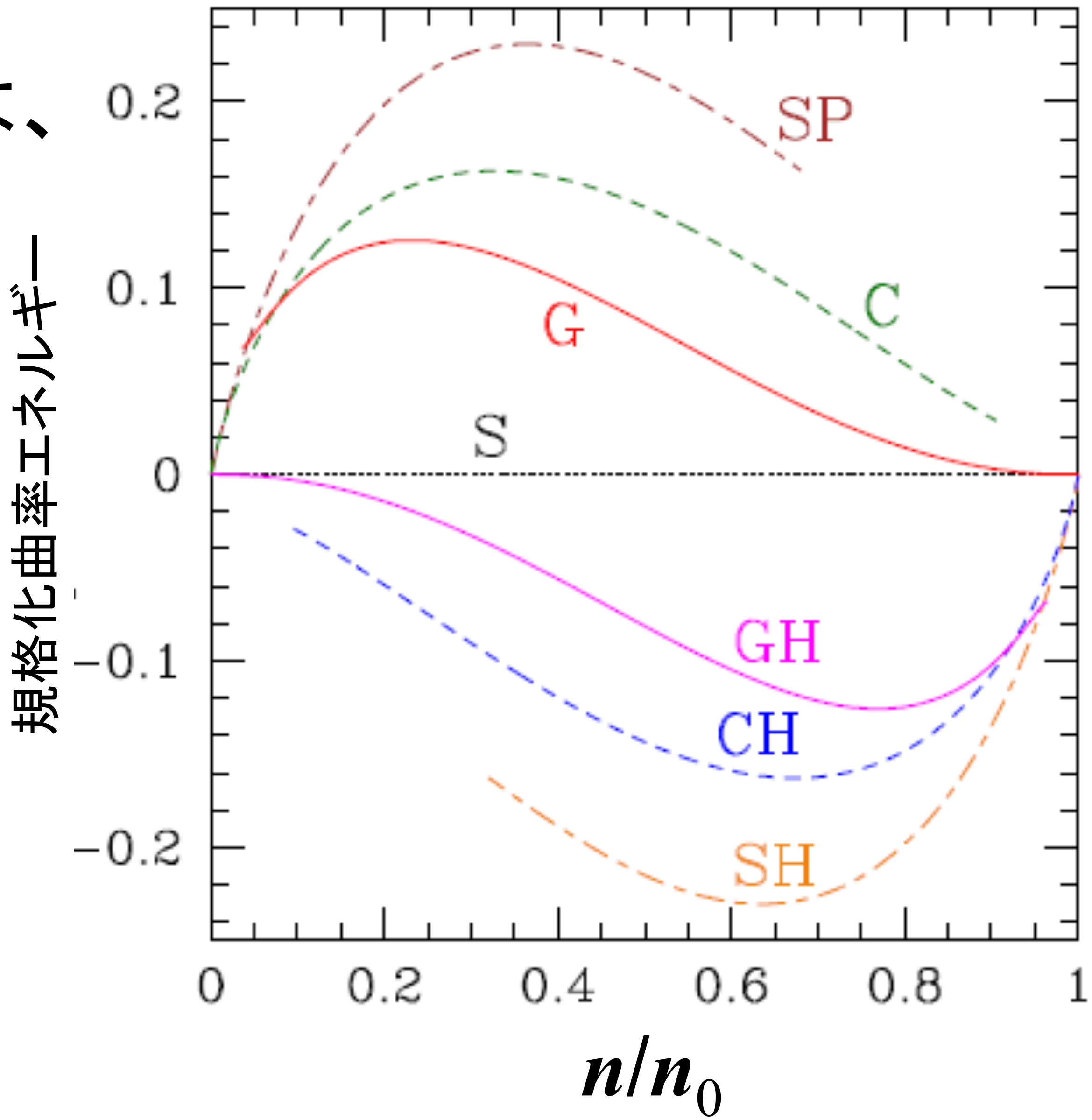
→ 十分、逆転可能な範囲。

- 高分子の場合に類似



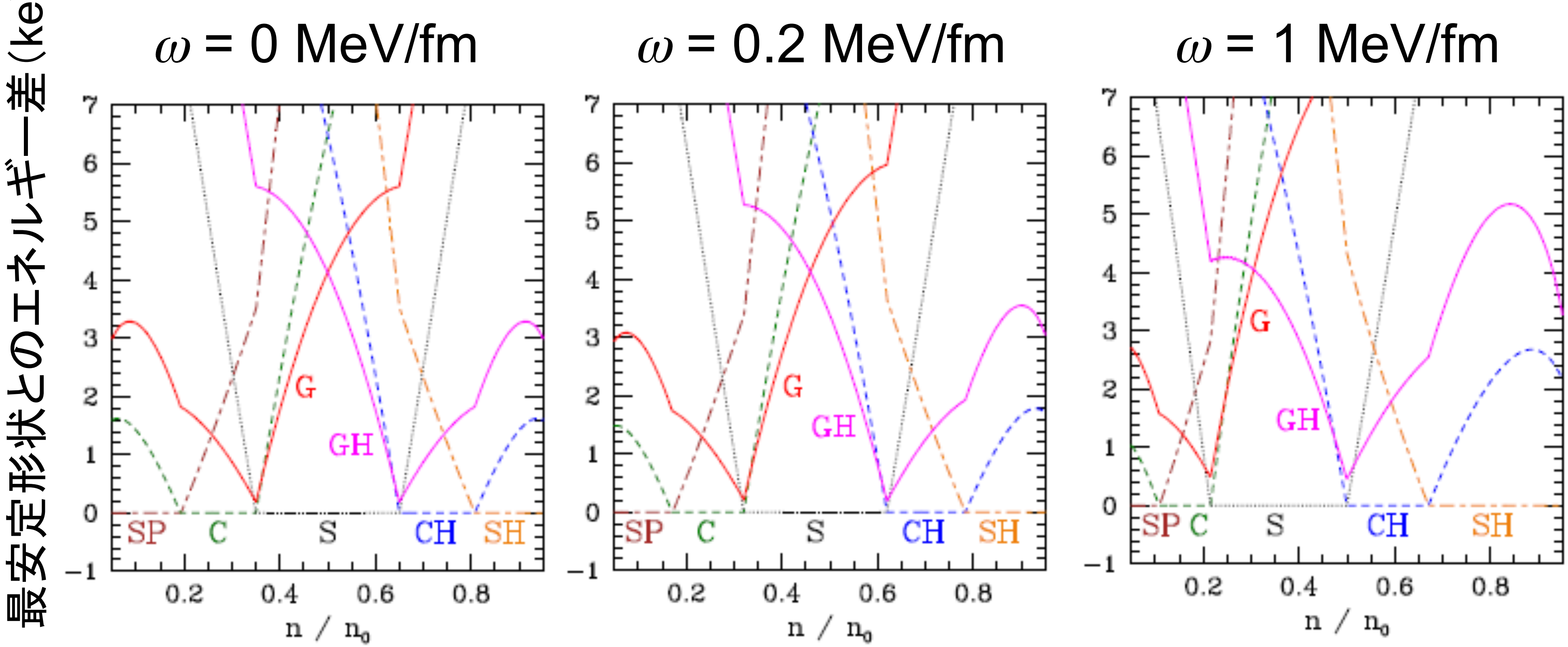
# 曲率エネルギーの形状依存性

- 通常のパスタでは、
  球(SP)
  > 円柱(C)
  > 板(S) = 0
- Gyroid は円柱と板の間。
- 孔原子核では符号が逆になる。



# 最安定形状（曲率ありの場合）

$\omega$：曲率の大きさの係数




- 定性的な振る舞いは、あまり変わらない。
- 低密度相ほど曲率エネルギーが大きいので、相転移点は低密度側にシフトする。

# まとめ

- 曲率項を取り入れた液滴模型による原子核パスタのエネルギーを定式化し、高分子から示唆される複雑な構造（Gyroid）までふくめて、各形状のエネルギーを計算した。

- Gyroid は最安定形状にはならないが、エネルギー差がほとんどなくなる点が存在する。
  - 高分子の場合との類似
  - 温度効果など今後の研究で検討される必要性

- 曲率エネルギーの大きさは、

  球 ＞ 円柱 ＞ gyroid ＞ 板（平面）= 0

  となり、相転移点を低密度側にシフトさせる。